干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

甘肃省人口-经济-社会-资源-环境系统耦合协调及可持续发展时空综合测度研究

李恒吉[1,2]， 曲建升[1,2]， 庞家幸[1]， 徐 丽[1]， 韩金雨[1]

（1 兰州大学资源环境学院，甘肃 兰州 730000；
2 中国科学院兰州文献情报中心 / 全球变化研究信息中心，甘肃 兰州 730000）

摘 要：如何实现人口、经济、社会、资源、环境系统的协调及可持续发展，是全人类共同面临的难题。以甘肃全省及其各市州为研究对象，基于GIS技术和各种数学分析方法，开展人口-经济-社会-资源-环境系统协调及可持续发展时空综合测度研究。结果表明：甘肃省及各市州的可持续发展综合水平总体上均呈现逐步上升趋势。甘肃省及各市州5大系统的耦合协调发展水平均保持稳步上升的良好趋势。可持续发展综合水平重心总体上在向东南方向移动，各子系统可持续发展水平重心，大致沿西北—东南方向分布。5大系统耦合协调度重心大致向东偏移，但偏移幅度不大，其演变相对比较平稳。

关 键 词：可持续发展；耦合协调；时空；系统；指标

文章编号：

自18世纪工业革命以来，人类在改造自然和发展经济方面成绩卓著，但对资源环境造成的压力愈来愈大[1]。人地系统中各要素间的矛盾愈发突出，各种负面反馈作用开始显现[2]。改革开放40 a来，中国经济实现了高速增长，但也出现了环境污染、生态恶化、资源枯竭等种种恶果，这些均制约了经济的持续稳定发展[3]。在此背景下，可持续发展成为全世界的共同选择。因此，如何实现人口、经济、社会、资源、环境（PESRE）之间的协调及可持续发展，成为中国亟须研究并解决的问题[4]。

早在20世纪50 ~ 60年代，人们在环境日益恶化与资源逐渐枯竭的现实下，开始对传统经济发展模式展开了思考[5]。如何实现人类经济社会快速发展的同时，做到合理开发资源、保护环境成为重要议题[6]。1987年，世界环境与发展委员会（WCED）首次在报告《我们共同的未来》中提出了可持续发展的概念[7]，引发了全球对于人地复合系统协调及可持续发展的研究热潮[8-10]。NORGAARD[11]在1990年提出协调发展理论，认为生态与社会系统之间共同发展可以通过反馈环来实现。随着可持续发展的相关研究逐渐丰富，人口-经济-社会-资源-环境系统协调及可持续发展定量测度成为该领域的热点与核心问题[12-14]。综合现有的研究成果发现，其研究重点在于测度模型与指标体系的构建。对测度模型方面的研究，主要集中于新古典增长模型、内生增长模型、投入产出模型、环境CGE模型、基于环境库兹涅茨曲线的模型、综合评价模型等方面[15-18]。一方面，对现有模型进行调整、修改和扩展。另一方面，构建新模型。就指标体系的研究而言，重点是明确指标与总体目标的具体关联，以及筛选最优指标和确定权重[19-21]。基于此，相关学者开展了大量研究，不同的国家和地区、不同的机构、不同的学者，提出了各自的指标体系，典型代表主要有：联合国可持续发展委员会制定了

收稿日期：2019-08-21； **修订日期：**2020-03-27

基金项目：国家重点研发计划项目“结构调整与减排管理对碳排放强度的作用规律及参数化”（2016YFA0602803）；国家自然科学基金项目（41561110，41261112）

作者简介：李恒吉（1985-），男，甘肃省庆阳人，在读博士，助理研究员，主要从事区域可持续发展与碳排放方面的研究. E-mail: lihengji@llas.ac.cn

通讯作者：曲建升（1973-），男，山东省莱阳人，研究员，博导，主要研究领域为可持续发展与碳排放方面的研究. E-mail: jsqu@lzb.ac.cn

一套分为社会、经济、环境和制度4个维度，包括134个指标，可以在世界范围内应用的指标体系；巴塞罗那欧洲议会提出了基于42个结构性指标所建立的欧洲的指标体系；英国、德国、美国等欧美国家也提出了自己的指标体系[22-25]。从国际视角来看，如何建立合理的人地系统协调及可持续发展的测度模型和指标体系，定量化测度其发展状态，是目前该方面研究的核心。

从20世纪80年代开始，中国的人口-经济-社会-资源-环境系统协调及可持续发展方面的研究一直在跟踪国际研究的趋势[26]。1991年，毛汉英最早提出的PRED系统协调发展理论是判断区域PRED系统是否协调发展的主要标准[27]。目前，国内关于该方面的研究，与国际研究趋势大体一致，主要聚焦于协调及可持续发展的定量测度。具体而言，就是从理论探讨和实践应用2个层面，开展测度模型和指标体系方面的研究。理论探讨主要集中在构筑指标体系、探讨分析相关理论、以及评价和判别方法等方面[28-30]。实际应用多集中在探讨局部区域的协调及可持续发展状况、及其随时间的演变等方面[31-33]。

目前的研究成果中，大多是从时间或空间某个单一维度来进行研究，且时间维度的测度研究较多，而空间维度的测度研究较少，更是缺少时空双维综合集成测度研究。特别是基于GIS技术，从时空两个维度上，对协调及可持续发展的演变规律及特征进行的综合集成测度研究，仍然相对不足，较为缺少。因此，本研究以甘肃全省及其各市州为研究对象，基于GIS技术和各种数学分析方法，开展人口-经济-社会-资源-环境系统协调及可持续发展时空综合测度研究，既能实现对现有研究成果的补充和完善，又能为甘肃省实现可持续发展战略提供理论支撑和决策依据，理论及现实意义均较为突出。

1 研究区概况

甘肃省位于中国西北部，界于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原3大高原的交汇地带，地形复杂，山脉纵横（图1）。东邻陕西，西邻新疆，南接四川、青海，北接宁夏、内蒙古，总面积52.59×10⁴ km²，下辖14个地级市州。截至2017年，人口总数2 627.71×10⁴人，GDP达到7 459.9×10⁸元，三次产业比重为11.53:34.34:54.13，人均可支配收入达到27 763元，农村居民恩格尔系数下降到30.36%。甘肃一直以来是一个以重工业为主的省份，经济的快速增长很大程度上是以能源高消耗为代价换取的。截止2017年，甘肃省万元GDP能耗为0.99 t标煤。传统经济增长方式导致甘肃省面对巨大的环境压力，2017年废水排放量为64 514×10⁴ t，废气排放量为9 007×10⁴ t，虽然排放量呈下降趋势，但环境污染的现状依然不容乐观。因此，如何在人口、经济、社会继续快速发展的同时，保证有效利用资源与保护环境，实现可持续发展，成为目前需要解决的首要问题。

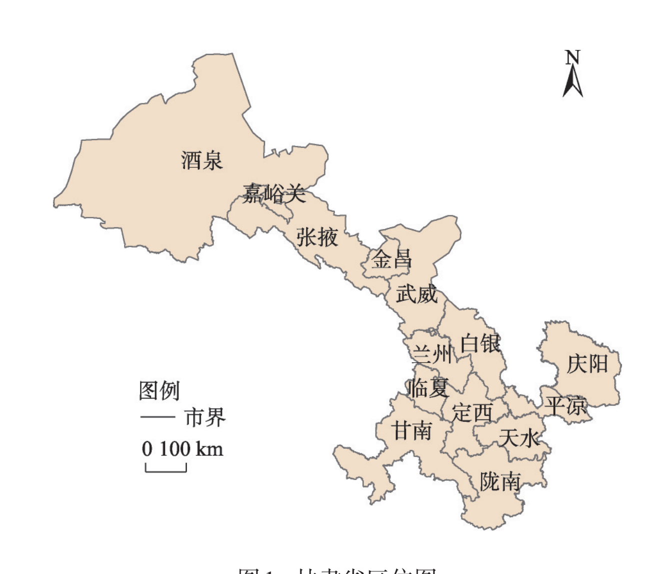


图1 甘肃省区位图

Fig. 1 Map of Gansu Province

2 数据与方法

2.1 指标体系与数据来源

全面性、有效性、系统性、代表性、独立性和可获取性是指标筛选的原则，本文在总结现有研究成果的基础上[34-36]，结合甘肃省实际情况及其发展特点，构建了包含人口-经济-社会-资源-环境5个方面的指标体系（表1）。本研究选取2000—2017年相关数据开展研究，数据来源于历年的《甘肃统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、各市州统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报、环境质量公报等统计资料。其中，数值越大，对于可持续发展越有利的指标为正向指标，反之则为负向指标。部分指标通过复合计算得到，在备注栏中进行了说明。

表1 人口-经济-社会-资源-环境系统指标体系

Tab. 1 Index system of population-economy-society-resource-environment systems

系统层	准则层	指标层	属性	备注
人口	人口规模	人口数量	−	
		人口密度	−	
	人口结构	老龄化系数	−	65岁及65岁以上的老年人口数/人口总数
		总抚养比	+	
		非农业人口比重	+	
	人口素质	平均预期寿命	+	
		人均受教育年限	+	
		大专及以上学历人口比重	+	
经济	经济水平	人均GDP	+	
		人均地方财政收入	+	地方财政总收入/人口总数
		人均固定资产投资	+	固定资产投资总额/人口总数
		人均社会消费品零售总额	+	社会消费品零售总额/人口总数
	经济结构	对外贸易依存度	+	进出口总额/GDP
		第一产业产值占GDP比重	−	
		第三产业产值占GDP比重	+	
	经济效率	投入产出比	+	地方财政收入/全社会固定投资
社会	人民生活质量	农村居民人均可支配收入	+	
		城镇居民人均可支配收入	+	
		农村居民恩格尔系数	−	
		城镇居民恩格尔系数	−	
	社会发展水平	城镇人均住宅建筑面积	+	
		每万户互联网宽带用户数	+	互联网宽带用户数/(总户数·10^{-4})
		人均公路运输里程	+	公路运输总里程/人口总数
		人均邮电业务量	+	邮电业务总量/人口总数
		每万人拥有卫生技术人员数	+	卫生技术人员数量/(人口总数·10^{-4})
		社会保障支出占GDP比重	+	社会保障支出/GDP
		城镇就业率	+	
资源	资源条件	人均水资源量	+	水资源总量/人口总数
		人均耕地面积	+	耕地总面积/人口总数
		人均能源生产量	+	能源生产总量/人口总数
		人均森林积蓄量	+	森林蓄积量/人口总数
	资源利用	万元GDP水耗	−	
		万元GDP能耗	−	
		粮食单产	+	粮食总产量/粮食作物实际占用的耕地面积(可衡量耕地资源的利用效率)
		城市工业用水重复利用率	+	
环境	环境污染	废水排放总量	−	
		工业废气排放总量	−	
		工业固体废物排放总量	−	
		生活垃圾排放量	−	
	环境治理	工业废水排放达标率	+	
		工业固体废物综合利用率	+	
		生活垃圾无害化处理率	+	
	环境保护与建设	森林覆盖率	+	
		人均公共绿地面积	+	
		空气质量达到或好于2级的天数	+	
		环保投资占GDP比重	+	环保投资总额/GDP

2.2 权重确定（熵值AHP法）

2.2.1 数据标准化处理 将指标进行标准化处理，具体步骤如下：

$$\text{正向指标：}\quad x_{ij}' = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \tag{1}$$

$$\text{负向指标：}\quad x_{ij}' = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \tag{2}$$

2.2.2 熵值法 熵值法是用来判断指标离散程度的一种客观赋权法[37]。

首先计算第j项指标下第i个评价对象的指标值的比重P_{ij}。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} x_{ij}} \tag{3}$$

再计算第j项指标的熵值e_j与信息冗余程度d_j。

$$e_j = -k\sum_{i=1}^{m} p_{ij}\ln(p_{ij}),\quad d_j = 1 - e_j \tag{4}$$

式中：$k = \frac{1}{\ln m}$：$\frac{1}{\ln m} \geqslant 0$，若$p_{ij} = 0$，则定义为$\lim_{p_{ij}\to 0} p_{ij}\ln p_{ij} = 0$。

最后确定指标的权重：

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \tag{5}$$

2.2.3 层次分析法 层次分析法是将评价指标体系分成目标层、准则层、方案层，然后进行分析的一种主观赋权方法[38]。

$$\partial_j = \sum t_j q_j \tag{6}$$

式中：t_j为第一层指标权重；q_j为第二层指标权重。

2.2.4 综合赋权法 熵值法侧重于指标数据的客观性，而层次分析法侧重于研究者的主观判断，二者皆有弊端。因此，本文采用将熵值法与层次分析法相结合的主客观综合赋权法求权重，能够扬长避短，增强研究结果的科学性和准确性。

第j个指标的综合权重μ_j为[39]：

$$\mu_j = \frac{w_j\partial_j}{\sum_{i=1}^{m} w_j\partial_j} \tag{7}$$

式中：w_j为熵值法求取的权重；∂_j为AHP法求取的权重。

2.3 可持续发展评价模型

计算各子系统的可持续发展评价指数[33-34]，公式如下：

$$U_j = \sum_{j=1}^{m} \mu_j x_{ij}',\ (U_j = M_j, N_j, X_j, Y_j, Z_j) \tag{8}$$

式中：μ_j为各指标的权重；x_{ij}'为各指标的标准化值；U_j代表各系统的评价值。

2.4 耦合协调度模型

计算人口、经济、社会、资源、环境系统耦合度[39-41]，公式如下：

$$C = \left\{\frac{M_j \times N_j \times X_j \times Y_j \times Z_j}{\left[(M_j + N_j + X_j + Y_j + Z_j)/5\right]^5}\right\}^{\frac{1}{5}} \tag{9}$$

式中：C为耦合度，其值界于0～1之间。M_j、N_j、X_j、Y_j、Z_j代表各子系统的可持续发展评价指数。

计算五大系统之间耦合协调度的公式如下：

$$D = \sqrt{CT} \tag{10}$$

$$T = aM_j + bN_j + cX_j + dY_j + eZ_j \tag{11}$$

式中：D为耦合协调度；T为五大系统可持续发展综合评价指数；a、b、c、d、e为待定系数，考虑到人口、经济、社会、资源、环境五大系统重要程度相当，并参考相关研究成果[27-29]，将待定系数定为$a = b = c = d = e = 0.2$。

参考相关文献中对耦合协调度的分级方法，将系统间的耦合协调度分为4个等级[39]（表2）。

2.5 重心计算模型

重心计算公式为[42-43]：

$$x = \left(\sum_{i=1}^{n} z_i x_i\right) \Big/ \left(\sum_{i}^{n} z_i\right) \tag{12}$$

$$y = \left(\sum_{i=1}^{n} z_i y_i\right) \Big/ \left(\sum_{i}^{n} z_i\right) \tag{13}$$

式中：Z_i为第i个空间单元的要素值；，x_i，y_i为其空间平面坐标；x，y为该项要素在整个区域内的分布重心的空间平面坐标。

表2 耦合协调度等级划分

Tab. 2 Classification of coupling coordination degree

耦合协调度	[0，0.4）	[0.4～0.5）	[0.5～0.6）	[0.6~1]
协调等级	失调衰退	濒临失调衰退	勉强协调发展	协调发展

3 结果与分析

3.1 可持续发展评价

3.1.1 甘肃省可持续发展评价 总体而言，甘肃省可持续发展综合水平指数逐步上升(图2)。说明近十余年来，甘肃省的可持续发展已经步入正轨并且取得良好的成效。其中，经济、社会子系统可持续发展起点较低，但增速较快，已经远远超过人口、资源、环境子系统的可持续发展水平。人口与环境子系统可持续发展起点相对较高，虽然稳定增长，但增速较慢。资源子系统可持续发展评价指数虽然总体呈上升态势，但波动比较剧烈，不太稳定。

3.1.2 各市州可持续发展评价 2000—2005年是各市州人口子系统可持续发展水平提升的主要时期，在此期间，所有地区人口子系统可持续发展水平提升比较显著。2010年、2015年、2017年变化不大。嘉峪关市人口可持续发展水平增速最快，金昌和酒泉次之。究其原因，是因为这3座城市主要集中在甘肃的河西走廊地区，人口密度不大，城镇人口以及高学历人口比重远高于其他地区。陇南、定西和天水人口可持续发展水平增长幅度最小，提高人口素质是这3个地区人口子系统可持续发展的关键。

从经济子系统可持续发展评价指数来看，各市州经济可持续发展的总体态势良好(表3~7)。2000—2005年是经济增长的黄金时期，各地区的经济可持续发展水平起点普遍不高，但嘉峪关市、金昌市、兰州市经济发展迅速，拉开了与其他地区的差距。这3座城市投入产出比远高于其他地区，产业结构比较合理。其他市州的经济可持续发展水平增长有限，其中定西市、陇南市、甘南州与临夏州增长最为缓慢。这些市州主要集中在甘肃省的中部和南部地区，缺乏优势产业带动，经济增长的推动力不足。

2000—2017年，甘肃省各市州社会子系统可持续发展评价指数波动比较剧烈。2000—2005年期间，社会可持续发展水平的增速比较快。增速最快的为嘉峪关市、酒泉市、兰州市和金昌市，主要集中在省会以及河西走廊地区。2010年除武威外，其余地区的社会子系统可持续发展水平出现不同程度下降。2015年除武威外，各市州社会子系统可持续发展水平总体上又开始有所回升。2017年基本稳定，变化不大。

从资源子系统可持续发展评价指数来看，2005年资源子系统可持续发展水平增速最快，2010年基本稳定。2015年，除嘉峪关持续增长外，其余地区资源子系统可持续发展水平都出现不同程度的下降。2017年，嘉峪关仍在继续增长，其余地区基本与2015年持平。总体来看，资源子系统可持续发展水平最高的是甘南州和陇南市，而经济发展较好的金昌市与兰州市反而较低。

纵观环境子系统可持续发展评价指数，总体来看，2005年比2000年有了较大的提升。2010年，除天水外，其余各市州环境可持续发展水平继续提升。2015年有所下滑，2017年又略有回升。其中，金昌市与嘉峪关市环境子系统可持续发展水平较高，环境状况较好。

2000—2017年，从甘肃省各市州可持续发展综

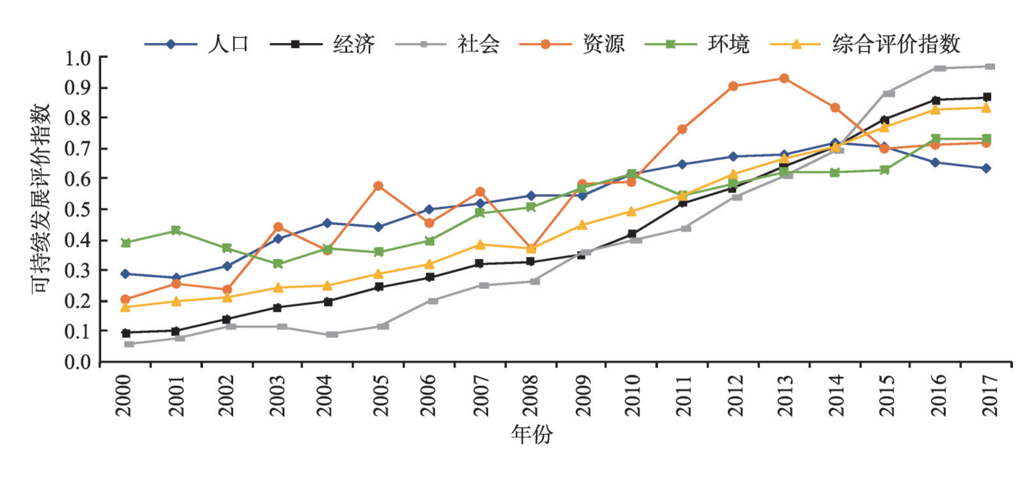


图2 甘肃省可持续发展评价指数

Fig. 2 Evaluation index of sustainable development in Gansu Province

合评价指数来看，各市州可持续发展综合水平总体呈上升态势，但上升幅度较小，且部分地区波动较大。其中，嘉峪关市可持续发展综合水平最高，金昌、兰州、酒泉次之；定西、陇南、临夏、平凉的可持续发展综合水平较低，总体呈西北高东南低的格局。

3.2 耦合协调发展分析

3.2.1 甘肃省耦合协调发展分析 由图3可知，2000—2017年甘肃省五大系统的耦合协调发展水平正在向着良性发展的方向演化。具体而言，2004年以前，甘肃省五大系统之间的耦合协调发展并不乐观。2005年，处于勉强协调发展的状态。之后五大系统的耦合协调发展水平进一步提升，逐步达到了协调发展的状态。结合甘肃省可持续发展评价结果来看，甘肃省五大系统耦合协调发展趋势与其可持续发展综合水平的演化趋势基本一致，二者相互促进，相辅相成。

3.2.2 各市州耦合协调发展分析 总体而言，甘肃省各市州耦合协调度的发展变化基本符合稳步增长的趋势，与全省耦合协调度的演化趋势基本一

表3 2000年各市州可持续发展评价指数

Tab. 3 Evaluation index of sustainable development of different cities (prefectures) in 2000

		人口	经济	社会	资源	环境	综合评价指数
2000年	兰州	0.111 7	0.117 9	0.106 6	0.019 3	0.053 9	0.409 0
	嘉峪关	0.250 1	0.130 1	0.130 4	0.058 8	0.084 5	0.653 9
	金昌	0.178 1	0.095 1	0.079 1	0.036 1	0.074 6	0.463 0
	白银	0.090 8	0.047 9	0.051 2	0.018 3	0.038 4	0.246 6
	天水	0.010 7	0.022 6	0.033 8	0.022 6	0.037 4	0.127 0
	武威	0.081 7	0.021 6	0.036 5	0.035 3	0.102 9	0.278 0
	张掖	0.106 2	0.027 2	0.041 8	0.050 7	0.018 3	0.244 2
	平凉	0.054 9	0.022 1	0.025 0	0.027 1	0.039 1	0.168 2
	酒泉	0.132 3	0.056 1	0.076 2	0.051 5	0.033 6	0.349 8
	庆阳	0.043 9	0.020 3	0.029 9	0.026 0	0.033 7	0.153 8
	定西	0.023 0	0.011 2	0.034 6	0.026 8	0.031 2	0.126 7
	陇南	0.038 0	0.009 3	0.045 3	0.049 8	0.033 1	0.175 5
	临夏	0.056 3	0.011 5	0.036 3	0.024 0	0.034 5	0.162 6
	甘南	0.125 8	0.024 2	0.102 5	0.039 3	0.036 4	0.328 3

表4 2005年各市州可持续发展评价指数

Tab. 4 Evaluation index of sustainable development of different cities (prefectures) in 2005

		人口	经济	社会	资源	环境	综合评价指数
2005年	兰州	0.343 5	0.442 6	0.567 7	0.291 3	0.335 8	0.396 7
	嘉峪关	0.851 0	0.811 4	0.724 7	0.406 5	0.627 4	0.745 0
	金昌	0.632 5	0.586 0	0.433 0	0.290 5	0.618 4	0.549 5
	白银	0.344 6	0.173 2	0.369 8	0.283 2	0.381 4	0.305 9
	天水	0.130 4	0.123 8	0.353 1	0.344 5	0.563 4	0.240 8
	武威	0.266 8	0.093 3	0.321 4	0.298 7	0.557 0	0.273 2
	张掖	0.442 1	0.124 6	0.491 2	0.424 6	0.378 5	0.365 7
	平凉	0.201 1	0.120 8	0.264 2	0.388 1	0.382 8	0.235 0
	酒泉	0.493 3	0.223 5	0.613 7	0.354 1	0.366 5	0.418 7
	庆阳	0.216 6	0.125 7	0.254 0	0.383 2	0.335 0	0.233 9
	定西	0.107 7	0.044 1	0.225 0	0.386 8	0.290 1	0.164 6
	陇南	0.174 4	0.064 2	0.175 6	0.640 5	0.260 0	0.210 5
	临夏	0.226 3	0.076 1	0.136 7	0.289 8	0.389 6	0.202 9
	甘南	0.439 8	0.106 5	0.315 3	0.529 2	0.354 5	0.340 6

表5　2010年各市州可持续发展评价指数

Tab. 5　Evaluation index of sustainable development of different cities (prefectures) in 2010

		人口	经济	社会	资源	环境	综合评价指数
2010年	兰州	0.389 9	0.402 5	0.356 8	0.302 9	0.444 5	0.383 7
	嘉峪关	0.850 7	0.587 9	0.523 6	0.407 3	0.630 8	0.653 9
	金昌	0.641 2	0.695 4	0.311 5	0.251 5	0.733 1	0.555 6
	白银	0.372 9	0.183 7	0.211 2	0.327 7	0.402 0	0.297 4
	天水	0.116 3	0.118 3	0.161 6	0.349 2	0.439 0	0.189 6
	武威	0.318 5	0.079 7	0.470 3	0.300 5	0.620 3	0.335 3
	张掖	0.439 2	0.120 5	0.251 4	0.432 2	0.445 0	0.331 4
	平凉	0.230 7	0.127 8	0.177 0	0.410 4	0.413 8	0.238 0
	酒泉	0.532 4	0.281 8	0.315 3	0.357 8	0.481 7	0.409 2
	庆阳	0.208 5	0.187 6	0.181 0	0.422 7	0.427 1	0.246 7
	定西	0.146 1	0.045 0	0.144 6	0.406 1	0.451 4	0.188 0
	陇南	0.140 8	0.085 1	0.158 4	0.656 3	0.396 1	0.215 7
	临夏	0.218 0	0.072 3	0.078 2	0.293 9	0.422 5	0.190 3
	甘南	0.425 4	0.116 6	0.294 9	0.546 5	0.430 8	0.344 6

表6　2015年各市州可持续发展评价指数

Tab. 6　Evaluation index of sustainable development of different cities (prefectures) in 2015

		人口	经济	社会	资源	环境	综合评价指数
2015年	兰州	0.407 1	0.729 5	0.570 1	0.222 3	0.315 2	0.457 7
	嘉峪关	0.784 9	0.646 0	0.693 0	0.485 8	0.662 5	0.687 3
	金昌	0.629 8	0.635 9	0.431 8	0.255 9	0.478 9	0.527 7
	白银	0.351 4	0.211 9	0.280 3	0.215 5	0.284 4	0.286 0
	天水	0.125 2	0.181 0	0.225 9	0.277 4	0.359 6	0.208 4
	武威	0.305 5	0.137 6	0.294 4	0.253 2	0.411 1	0.282 4
	张掖	0.442 4	0.203 7	0.326 0	0.349 9	0.314 0	0.346 4
	平凉	0.244 0	0.102 6	0.264 9	0.308 7	0.227 7	0.226 4
	酒泉	0.511 3	0.380 8	0.420 9	0.349 7	0.387 6	0.432 2
	庆阳	0.257 8	0.218 1	0.411 3	0.339 8	0.312 4	0.295 0
	定西	0.151 4	0.098 4	0.263 9	0.320 8	0.214 4	0.191 2
	陇南	0.156 6	0.102 0	0.279 5	0.537 5	0.169 7	0.216 0
	临夏	0.210 0	0.137 4	0.203 6	0.195 9	0.375 4	0.219 7
	甘南	0.393 0	0.163 1	0.276 5	0.426 1	0.270 7	0.315 1

致。其中，地处河西走廊的嘉峪关、金昌耦合协调发展水平一直保持在前两名，东南部地区的陇南、定西的耦合协调度一直处于最末端。从空间分布上看，甘肃省各市州的耦合协调发展水平总体呈现西北高东南低的格局，这与其可持续发展综合水平的空间分布格局基本一致。

将各市州的耦合协调发展水平进行分类(图4)：(1) 2000年有6个市州处于失调衰退状态，主要集中在甘肃东部和南部地区。2005年，只有定西依然处于失调衰退状态。2015年，定西退出失调衰退状态，之后即没有处于失调衰退状态的地区。(2) 2000年濒临失调衰退的城市有3个。2005年增加到6个。2010年减少到4个。2015年又增加到5个。2017年保持不变。(3) 2000年五大系统达到勉强协调发展水平的城市有3个。2005年仍然是3个。2010年增加至4个。2015年增加至5个。2017年保持不变。其中，甘南一直处于勉强协调发展的水平。(4) 2000年五大系统达到协调发展水平的城市有2个，分别是嘉峪关和金昌。2005年兰州与酒泉也达到了协调发展水平。2010年、2015年、2017

表7　2017年各市州可持续发展评价指数

Tab. 7　Evaluation index of sustainable development of different cities (prefectures) in 2017

		人口	经济	社会	资源	环境	综合评价指数
2017年	兰州	0.404 5	0.702 8	0.589 1	0.199 7	0.217 3	0.444 1
	嘉峪关	0.785 1	0.691 7	0.735 6	0.524 3	0.579 4	0.697 0
	金昌	0.627 3	0.669 2	0.458 4	0.254 7	0.593 1	0.556 3
	白银	0.348 6	0.230 8	0.278 3	0.236 7	0.348 1	0.299 0
	天水	0.132 6	0.185 7	0.230 6	0.270 9	0.375 5	0.210 3
	武威	0.305 3	0.131 6	0.312 2	0.250 6	0.442 8	0.283 3
	张掖	0.433 6	0.212 1	0.328 0	0.352 0	0.399 7	0.356 4
	平凉	0.241 3	0.096 8	0.273 2	0.297 7	0.286 1	0.230 6
	酒泉	0.509 3	0.367 1	0.464 7	0.356 4	0.332 5	0.429 7
	庆阳	0.246 8	0.167 2	0.419 5	0.334 4	0.298 1	0.277 4
	定西	0.147 4	0.073 5	0.239 6	0.316 0	0.301 4	0.190 1
	陇南	0.152 3	0.094 3	0.293 4	0.533 9	0.256 0	0.226 1
	临夏	0.207 6	0.122 9	0.192 3	0.172 9	0.339 3	0.201 7
	甘南	0.381 0	0.152 7	0.283 4	0.412 1	0.281 1	0.308 8

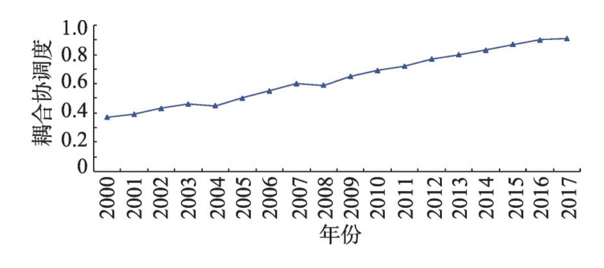


图3　甘肃省耦合协调度

Fig. 3　Coupling coordination degree in Gansu Province

年处于协调发展状态的城市依然只有4个，且耦合协调度的变化幅度不大。

3.3　重心偏移分析

3.3.1　可持续发展重心偏移分析　各子系统可持续发展水平的重心分布及演变轨迹如图5所示。2000—2017年，人口子系统重心总体上在向东南方向移动，这表明甘肃省东南部的人口子系统可持续发展水平增速较快。经济子系统重心的移动主要集中在西北—东南方向。社会子系统重心与经济子系统重心的移动趋势大体上一致，也是主要集中在西北—东南方向。资源子系统重心的移动主要集中在东南—西北方向。环境子系统重心波动较大，呈非定向偏移。

关于五大子系统可持续发展水平重心，从移动距离来看，其波动的剧烈程度从大到小排序为：资源、社会、环境、经济、人口。从空间分布来看，各子系统重心在空间分布格局上有一定的规律性，大致沿西北—东南方向分布。其中，经济子系统和人口子系统重心偏向西北分布，资源子系统重心偏向东南分布，社会子系统和环境子系统重心位于中部。从时间序列变化看来，2000—2005年、2010—2015年，五大子系统重心位移幅度相对较大；2005—2010年、2015—2017年，其位移幅度相对较小一些。

可持续发展综合水平的重心演变轨迹如图6所示。2000—2017年，可持续发展综合水平重心总体上在向东南方向移动。2000—2005年、2005—2010年，可持续发展综合水平重心持续向东南方向移动，且移动幅度较大。2010—2015年，可持续发展综合水平重心继续向东南方向略微移动，但移动幅度较小。这表明甘肃省东南部地区的可持续发展综合水平增速较快，发展势头较为强劲。2015—2017年，可持续发展综合水平重心向西北方向有一定的回移，但移动幅度较小。这表明甘肃省西北部地区的可持续发展综合水平有所提高，得到了一定程度的改善。

3.3.2　耦合协调度重心偏移分析　总体而言，2000—2017年，五大系统耦合协调度重心大致向东偏移，但偏移幅度不大，其演变相对比较平稳。耦合协调度重心在东西方向的偏移距离大于南北方向的偏移距离，这表明五大系统间的耦合协调发展水平在东西方向的增速差异大于南北方向。2000—2005年，五大系统耦合协调度重心向东北方向发生一定的偏移，表明甘肃省东北部地区五大系统间的耦合协调发展水平有一定改善。2005—

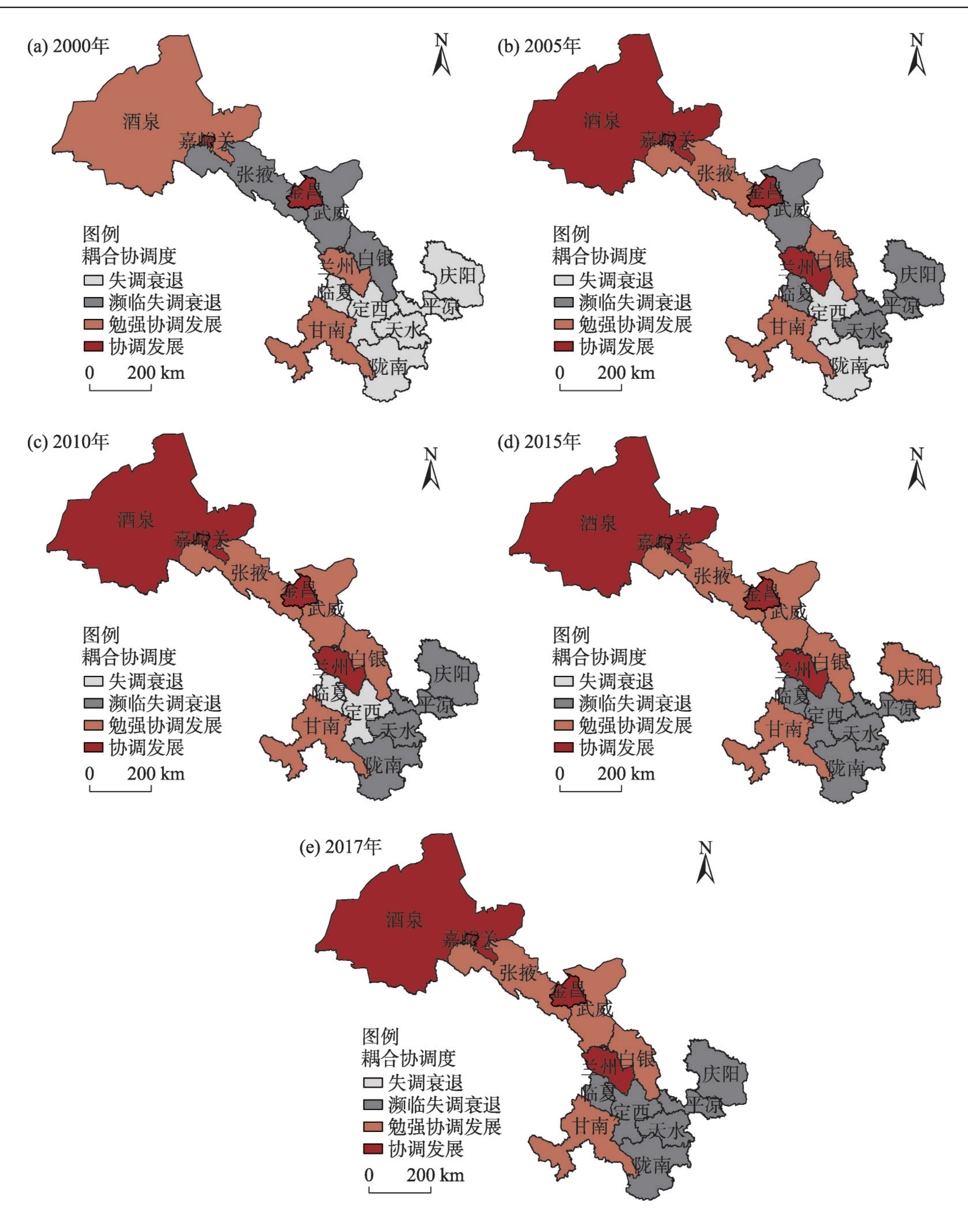


图4 各市州耦合协调度分类

Fig. 4 Classification of coupling coordination degree of different cities (prefectures)

2010年，耦合协调度重心向东轻微偏移，偏移距离很小。2010—2015年，耦合协调度重心向东南方向发生一定的偏移，表明甘肃省东南部地区五大系统间的耦合协调发展水平有所提升。2015—2017年，耦合协调度重心向西北轻微偏移，偏移距离很小。

4 结 论

甘肃省可持续发展综合水平总体上呈现逐步上升趋势。其中，经济、社会子系统可持续发展水平增速较快，人口、环境子系统可持续发展水平增长比较平稳，资源子系统可持续发展水平波动较大。各市州的可持续发展综合水平总体上均呈现逐步上升趋势，但上升幅度有限，且部分地区波动较大。其中，各子系统可持续发展水平的发展演变趋势有所区别，且存在着明显的空间差异。

甘肃省五大系统的耦合协调发展水平保持稳步上升的良好趋势。各市州五大系统的耦合协调发展水平的演变基本符合稳步增长的趋势，与全省

图5 子系统重心分布及演变轨迹

Fig. 5 Distribution and evolution of gravity center of subsystems

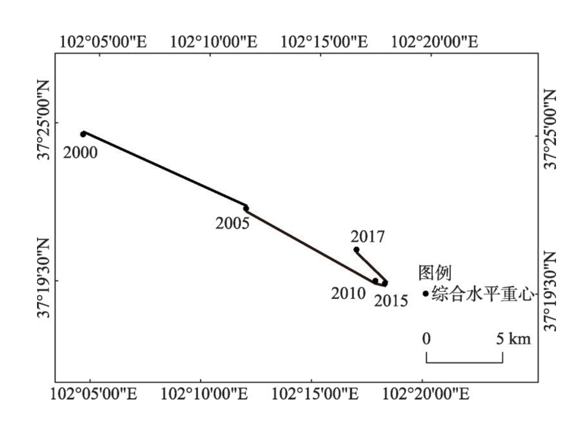


图6 可持续发展综合水平重心演变轨迹

Fig. 6 Distribution and evolution of gravity center of comprehensive level of sustainable development

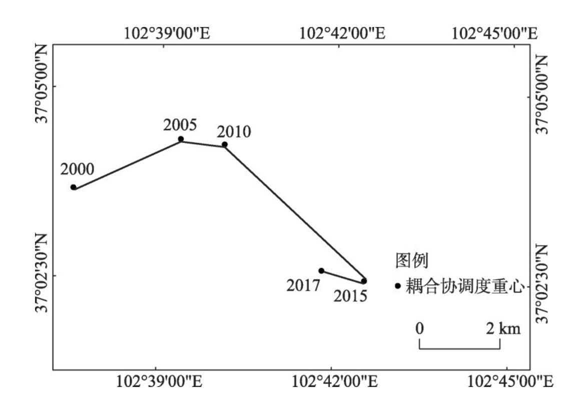


图7 耦合协调度重心演变轨迹

Fig. 7 Distribution and evolution of gravity center of coupling coordination degree

的演化趋势基本一致。其中,处于失调衰退和濒临失调衰退状态的市州数量逐渐减少,而处于协调发展和勉强协调发展状态的市州数量逐渐增加。

可持续发展综合水平重心总体上在向东南方向移动,甘肃省东南部地区的可持续发展综合水平增速较快,发展势头较为强劲。各子系统可持续发展水平重心,大致沿西北—东南方向分布,且以西北—东南方向偏移为主。其中,经济子系统和人口子系统重心偏向西北分布,资源子系统重心偏向东南分布,社会子系统和环境子系统重心位于中部。五大系统耦合协调度重心大致向东偏移,但偏移幅度不大,其演变相对比较平稳。耦合协调度重心在东西方向的偏移距离大于南北方向的偏移距离,即五大系统间的耦合协调发展水平在东西方向的增速差异大于南北方向。

参考文献(References)

[1] GROSSMANG M, KRUEGER A B. Economic growth and the environment[J]. NBER Working Papers, 1994, 110(2): 353-377.

[2] BARBIER E B, STERN D I, COMMON M S. Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development[J]. World Development, 2004, 24(7): 1151-1160.

[3] 李茜, 胡昊, 李名升, 等. 中国生态文明综合评价及环境、经济与社会协调发展研究[J]. 资源科学, 2015, 37(7): 1444-1454. [LI Qian, HU Hao, LI Mingsheng, et al. Ecological civilization evaluation and coordinated development between environment, economy and society[J]. Resources Science, 2015, 37(7): 1444-1454.]

[4] 石培基, 杨银峰, 吴燕芳. 基于复合系统的城市可持续发展协调性评价模型[J]. 统计与决策, 2010, (14): 36-38. [SHI Peiji, YANG Yinfeng, WU Yanfang. Evaluation model of urban sustainable development coordination based on composite system[J]. Statistics & Decision, 2010, (14): 36-38.]

[5] DESAI M, VICTOR P A. Pollution: Economy and environment[J]. Economica, 1972, 41(163): 350.

[6] JOSELOW M M, TOBIAS E, KOEHLER R, et al. Manganese pollution in the city environment and its relationship to traffic density [J]. American Journal of Public Health, 1978, 68(6): 57-60.

[7] World Commission on Environment and Development. Our common future[M]. Oxford, England: Oxford University Press, 1987: 53-78.

[8] CULBERTSON J M. Economic growth, population, and the environment[J]. Population and Environment, 1990, 11(2): 83-100.

[9] SECRETARIAT A. The impact of expanding population and economic growth on food, energy, and the environment[M]. Singapore APEC Secretariat, 1998.

[10] TYREE A. Population growth and economic development: Policy questions[J]. Population and Resources in A Changing World Current Readings, 1989, 82(400): 1180.

[11] NORGAARD R B. Economic indicators of resource scarcity: A critical essay[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1990, 19(1): 19-25.

[12] BLOOM D E, FINLAY J E. Demographic change and economic growth in Asia[J]. Asian Economic Policy Review, 2009, 4(1): 45-64.

[13] CAIRNSRD, MARTINET V. An environmental-economic measure of sustainable development[J]. European Economic Review, 2014, 69: 4-17.

[14] CAILEAN D, TEODOSIU C. An assessment of the Romanian solid waste management system based on sustainable development indicators[J]. Sustainable Production and Consumption, 2016, 8: 45-56.

[15] 赵雪雁, 刘霜, 赵海莉. 基于能值分析理论的生态足迹在区域可持续发展评价中的应用——以甘肃省为例[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 524-531. [ZHAO Xueyan, LIU Shuang, ZHAO Haili. Application of ecological footprint in evaluating regional sustainable development based on energy analysis theory[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 524-531.]

[16] BASTIANONI S, COSCIEME L, PULSELLI F M. The input-state-output model and related indicators to investigate the relationships among environment, society and economy[J]. Ecological Modelling, 2016, 325: 84-88.

[17] TAPIA G, JOSE A, IONIDES E L. Population health and the economy: Mortality and the great recession in Europe[J]. Health Economics, 2017, 26(12): 219-235.

[18] YAHOO M, OTHMAN J. Employing a CGE model in analysing the environmental and economy-wide impacts of CO_2 emission abatement policies in Malaysia[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584-585: 234-243.

[19] KIM J, RABORA F. Sustainable development, education for sustainable development and Philippine community[J]. Management of Sustainable Development, 2017, 8(2): 29-34.

[20] ŠIPILOVA V, OSTROVSKA I, JERMOLAJEVA E. Evaluation of sustainable development in rural territories in Latgale Region (Latvia) by using the conception of smart specialization[J]. Journal of Teacher Education for Sustainability, 2017, 19(1): 82-105.

[21] TAN Sieting, YANG Jin, YAN Jinyue. A holistic low carbon city indicator framework for sustainable development[J]. Applied Energy, 2017, 185(2): 1919-1930.

[22] United Nations Commission on Sustainable Development. Indicators of sustainable development: Framework and methodologies [R]. New York: United Nations, 1996.

[23] Department of the Environment. Indicators of sustainable development for the United Kingdom[J]. European Journal of Marketing, 1996, doi:10.1108/EUM0000000005129.

[24] HOFFMAN J. The roots index: Exploring indices as measures of local sustainable development, New York City: 1990-1995[J]. Social Indicators Research, 2000, 52(2): 95-134.

[25] LEUKHARDT F, ALLEN S. How environmentally focused is the

German sustainability strategy? A critical discussion of the indicators used to measure sustainable development in Germany[J]. Environment Development and Sustainability, 2013, 15(1): 149-166.

[26] 曾嵘, 魏一鸣, 范英, 等. 人口、资源、环境与经济协调发展系统分析[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(12): 1-6. [ZENG Rong, WEI Yiming, FAN Ying, et al. System analysis of harmonization development among population, resource, environment and economy [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2000, 20(12): 1-6.]

[27] 毛汉英. 县域经济和社会同人口、资源、环境协调发展研究[J]. 地理学报, 1991, (4): 385-395. [MAO Hanying. Study on coordinating development of economic, social growth with population, resources and environment at county level[J]. Acta Geographica Sinica, 1991,(4): 385-395.

[28] 方创琳. 天山北坡城市群可持续发展战略思路与空间布局[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 1-11. [FANG Chuanglin. Strategic thinking and spatial layout for the sustainable development of urban agglomeration in northern slope of Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 1-11.]

[29] 薛冰, 张子龙, 郭晓佳. 区域生态环境演变与经济增长的耦合效应分析——以宁夏回族自治区为例[J]. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1125-1131. [XUE Bing, ZHANG Zilong, GUO Xiaojia. A study on the coupling relationships between regional economic growth and environmental pressure: Case of Ningxia Autonomous Region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5): 1125-1131.]

[30] 董燕红, 钟定胜, 卢小丽. 主成分与层次分析法在区域可持续发展能力评价中的应用对比[J]. 环境与安全学报, 2016, 16(1): 359-365. [DONG Yanhong, ZHONG Dingsheng, LU Xiaoli. Comparative study of the application of PCA and AHP to the analysis and evaluation of the regional sustainable development[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 359-365.]

[31] 韩延玲, 高志刚. 新疆可持续协调发展动态分析与评价[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 289-293. [HAN Yanling, GAO Zhigang. Dynamic analysis and evaluation of the sustainable harmonic development in Xinjiang[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 30(2): 289-293.]

[32] 孔伟, 任亮, 王淑佳, 等. 河北省生态环境与经济协调发展的时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2941-2949. [KONG Wei, REN Liang, WANG Shujia, et al. Spatial and temporal evolution of the ecological environment and economy coordinated development in Hebei Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2941-2949.]

[33] 鹿晨昱, 朱卫利, 李恒吉. 陇东黄土高原地区可持续发展综合测度研究——以甘肃省庆阳市为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 210-217, 222. [LU Chenyu, ZHU Weili, LI Hengji. Study on comprehensive measurement of regional sustainable development in the Loess Plateau of east Gansu Province: A case of Qingyang City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 210-217, 222.]

[34] SINHA B S, DATTA S K. Revisiting the link between socio-economic development and environmental status indicators: Focus on panel data[J]. Environment, Development and Sustainability, 2015, 17(3): 567-586.

[35] 秦泗刚, 段汉明, 李正军. 资源型城市人口-经济-环境协调发展研究——以克拉玛依市为例[J]. 生态经济, 2016, 32(6): 93-97. [QIN Sigang, DUAN Hanming, LI Zhengjun. Study on coordinated development of population, economy and environment in resource: Taking Karamay City as an example[J]. Ecological Economy, 2016, 32(6): 93-97.]

[36] 鹿晨昱, 李文磊, 李恒吉, 等. 区域经济—社会—资源—环境协调发展的综合测度研究——以甘肃省庆阳市为例[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(8): 916-921. [LU Chenyu, LI Wenlei, LI Hengji. Study on comprehensive measurement of coordinated development of economy-society-resource-environment: A case study of Qingyang City, Gansu Province[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(8): 916-921.]

[37] 王伟, 张佳莹, 彭东慧, 等. 中国区域旅游发展潜力演变格局与影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 953-960. [WANG Wei, ZHANG Jiaying, PENG Donghui, et al. Evolving pattern and influencing factors of regional tourism development potential in China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 953-960.]

[38] 鲍超, 邹建军. 中国西北地区城镇化质量的时空变化分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 1141-1152. [BAO Chao, ZOU Jianjun. Spatiotemporal variations of urbanization quality in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 1141-1152.]

[39] 姜伟军. 人口-区域经济-环境发展耦合协调度分析[J]. 统计与决策, 2017, (15): 101-104. [JIANG Weijun. Analysis on the coupling coordination degree of population, regional economy and environment development[J]. Statistics & Decision, 2017, (15): 101-104.]

[40] 逯进, 常虹, 汪运波. 中国区域能源、经济与环境耦合的动态演化[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(2): 60-68. [LU Jin, CHANG Hong, WANG Yunbo. Dynamic evolution of provincial energy economy and environment coupling in China's regions[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(2): 60-68.]

[41] 李力, 洪雪飞, 王俊, 等. 基于 PLS 与 ESDA 的经济—能源—环境系统耦合协调发展研究[J]. 软科学, 2018, 32(11): 44-48, [LI-Li, HONG Xuefei, WANG Jun, et al. Coupling and coordinated development of economy-energy-environment system based on PLS-ESDA[J]. Soft Science, 2018, 32(11): 44-48.]

[42] 齐亚伟. 中国区域经济增长、碳排放的脱钩效应与重心转移轨迹分析[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2018, (5): 17-26. [QI Yawei. Decoupling effect and gravity center trajectory of regional economic growth and carbon emissions in China[J]. Modern Finance and Economics: Journal of Tianjin University of Finance and Economics, 2018, (5): 17-26.]

[43] 刁腾飞. 1978—2013 年河南省经济重心迁移轨迹分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016. [DIAO Tengfei. Tracing analysis on economic barycenter of Henan form 1978 to 2013[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016.]

Spatial-temporal synthetic measurement of coupling coordination and sustainable development of population-economy-society-resource-environment system in Gansu Province

LI Heng-ji[1,2], QU Jian-sheng[1,2], PANG Jia-xing[1], XU Li[1], HAN Jin-yu[1]

(1 *College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *Gansu, China;*

2 *Lanzhou Information Center, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*)

Abstract: How to achieve the coordination and sustainable development of population, economy, society, resource, and environment system is a common problem facing all mankind. This research uses various mathematical analysis methods and GIS technology on the Gansu Province, China and its sub-regions to conduct the spatial-temporal comprehensive measurement of coordination and sustainable development of population-economy-society-resource-environment system. It makes up for the lack of the research of sustainable development form single angle, and it provides theoretical support and decision-making basis to realize a strategy for the sustainable development of Gansu Province. The results are as follows. Overall, the comprehensive level of sustainable development in Gansu Province shows gradual upwards. Among them, the level of sustainable development of economic and social subsystems is growing faster. The sustainable development level of population and environment subsystems is growing steadily, and the sustainable development level of resource subsystem fluctuates greatly. The comprehensive level of sustainable development in each city and state shows a gradual upward trend. However, the increase is limited and volatile in some areas. Among them, the development trend of sustainable development level of each subsystem is different with obvious spatial differences. The coordination development level of the five systems in Gansu Province keeps a good steady rising trend. The evolution of the coordination development level of the five systems in each city and state is basically in line with the steady growth trend. The evolution trend is basically consistent with that of the whole Gansu province. Among them, the number of regions in the state of maladjusted recession and on the verge of maladjusted recession is gradually decreasing, while the number of regions in the state of coordination development and reluctant coordination development is gradually increasing. On the whole, the gravity center of the comprehensive level of sustainable development is moving towards southeast. The comprehensive level of sustainable development in the southeastern part of Gansu Province has grown fast with strong momentum of development. The sustainable development level focuses on the subsystems distributed along the northwest-southeast direction, where the northwest-southeast migration is the dominant direction. Among them, the gravity center of the economic subsystem and population subsystem focus on the northwest distribution, while the gravity center of the resource subsystem shifts to southeast. The gravity center of the society and environment subsystems is observed to be in the middle. The gravity center of the coupling coordination degree of the five systems shifts to eastward but the migration range is not large and its evolution is relatively stable. The gravity center offset distance of coupling coordination degree in the east-west direction is greater than the north-south direction. That is, the growth rate difference of the coordination development level among the five systems in the east-west direction is greater than that in the north-south direction.

Key word: sustainable development; coupling coordination; spatial-temporal; system; index